

10/563109

明 細 書

IAP20 Rec 170, P10 03 JAN 2006

パワーの流れを基にした複合システムのモデル化法

5

技術分野

本発明は、パワー（力）の流れを基にした複合システムのモデル化法及びシミュレーション方法に関し、機械、電気及び流体サブシステムで成る複雑な工学システムのためのパワーの流れを基にしたモデル化法及び自動シミュレーション方法を提供する。

10

背景技術

最近のエンジニアリングシステムは、より効果的な方法でより困難な仕事を達成するために、一層複雑になって来ている。そしてそれは通常、相互に作用する機械、電気、流体のサブシステムを含んでいる。そのような総合的なシステムの設計と開発では、そのパフォーマンスの予測と分析は設計品質を確実にして製品設計サイクルを短くし、開発コストを減少させ、概念設計の段階において特にオプション計画を調査することが、非常に重要なことである。エンジニアリングシステムが一層複雑化することで、CAE (Computer Aided Engineering) は、特に複雑なシステムのパフォーマンスを研究する強力なツールとして必要になる。総合的なシステムの階層的モデルを便宜的に読取る統一されたモデル化アプローチは、CAE システム技術への第一歩である。そして、システムの数学方程式と自動システム性能シミュレーションの自動的な導出は、CAE 技術の効率を大幅に高めるものである。

20

25

画一化されたモデル化法と自動数値シミュレーションは、長年研究さ

れている。グラフィックモデル化法は、エンジニアリングシステムの物理学と数学的記述のブリッジとして、画一化されたモデルを標準的な方法で読み易くし、異なった分野の技術者が他の分野の詳細な理論を知らずに、多分野システムを説明するために標準化されたモデルを理解することを可能にする 1 つの解決法である。グラフィックモデル化を基礎とするパワーの流れは、Ronald C. Rosenberg と Dean C. Karnopp によって開発されたボンドグラフ法や、Sumida Shizuo によって提案された機能モデル法などに接近しており、Nagamatsu Akio の理論は統一モデルを多分野システムに取り入れ、グラフィックモデルから数学方程式を自動的に生成する能力を持っている。Matlab (商品名) の商業用コードで Simulink (商品名) のツールを適応させたブロック線図、Beacon (商品名) の商業用コードの自動コード生成装置及び MATRIXx (商品名) の商業用コードの SystemBuilder (商品名) は、グラフィック手法で数学方程式を表わし、自動シミュレーションを実行すると共に、それらは特に制御システムの設計と構築に役立っている。

物理的システムの動力学は、パワーの流れと記述される構成要素中のパワー変換とから派生する。下記表 1 は、ボンドグラフにおける標準的なボンド変数及び要素を、機械システム、電気システム及び流体システムについて示している。

	機械システム		電気システム	流体システム
	直動システム	回転システム		
エフォート	動力: $F(N)$	トルク: $\tau(N \cdot m)$	電圧: $e(V)$	圧力: $P(Pa)$
流れ	速度: $V(m/s)$	角速度: $\omega(rad/s)$	電流: $I(A)$	体積流量率: $Q(m^3/s)$
インパルスの モーメント	モーメント: $P(N \cdot s)$	角度モーメント: $H(N \cdot m \cdot s)$	漏れ磁束: $\lambda(Wb)$	圧力の積算: $Pp(Pa \cdot s)$
移動量	移動量: $x(m)$	角度: $\theta(rad)$	充電: $q(C)$	体積: $V(m^3)$
パワー	$F \cdot V(W)$	$\tau \cdot \omega(W)$	$e \cdot I(W)$	$P \cdot Q(W)$
慣性要素	質量: $m(kg)$	慣性: $I(m^2)$	インダクタ: $L(Wb/A)$	流体慣性: $I(kg/m^4)$
キャパシタ 要素	バネ剛性: $K(N/m)$	コイルバネ剛性: $K(N \cdot m/rad)$	キャパシタ: $C(C/V)$	流体キャパシタ: $C(m^5/N)$
抵抗要素	抵抗: $R(N \cdot s/m)$	抵抗: $R(N \cdot m \cdot s/rad)$	抵抗: $R(V/A)$	流体抵抗: $R(N \cdot s/m^5)$
1-接合	共通速度	共通角速度	直列電気接続	共通体積流量率
0-接合	共通動力	共通トルク	並列電気接続	共通圧力
活性部	Se: 動力源 Sf: 速度源	Se: トルク源 Sf: 有理由速度源	Se: 電圧源 Sf: 電流源	Se: 圧力源 Sf: 体積流量率源

表 1

表 1 で示すように、種々のシステムにおける 1 対のエフォート及び流れ
5 の積のパワー表示（ステートメント）は著しく相似している。ボンドグラフと機能モデルは、パワー記述とパワー保護が相似していることに基
づいて開発されており、エフォート及び流れは、種々のシステムを統一
された形態に接続するための状態変数として使用される。

次に、Simulink の 3 種類のモデル化法、即ちボンドグラフ、機能モ
10 デル及びブロック線図をそれぞれ検証し、比較する。

(1) ボンドグラフモデル化法

ボンドグラフは、ほとんど全てに適用できる形式の集中定数システム
を表わすために一般化されたシンボル又は要素を使用し、高度に組織化

された図式的なモデル化法である。ボンドグラフの画像モデル、例えば第 11 図のボンドグラフモデルは表 1 に示すように、ボンドと呼ばれる線と、下記に示す 4 グループに分類される 9 つの基本的なボンドグラフ要素とで構成されている。なお、第 11 図は、ロープ等で吊された物体に対するボンドグラフモデルの例である。

- 1) 抵抗素子の放散フィールド
- 2) 慣性要素及びキャパシタ素子の蓄積フィールド
- 3) 0-接合、1-接合、変成器(TF)及びジャイレータ(GY)の一般的な接合構造グループ
- 4) 活性部(Se 及び Sf)のソースフィールド

接合点を持ったボンド接続要素が、ボンドの上側及び下側に示されているエフォート及び流れのボンド変数や、パワーの流れの方向に向けられている半矢印のボンド変数を有するパワー接続を特色付けている。ボンドのストロークを表わすマークは、各ポートでエフォート及び流れの入出力関係を示しているが、それは反対方向を流れるものである。抵抗 R、キャパシタ C、電流 I の各受動的な 1 ポート要素は、エフォート及び流れ或いはそれらの時間積分のボンド変数の間で構成法則を表わしている。抵抗 R はシステムからパワーを放散させ、キャパシタ C と電流 I はパワーを蓄積する。一般的にフロー接合と呼ばれる 1-接合はまた、ボンドの流れが等しくかつ全てのエフォートの代数和がゼロであるといった特別な性質を持っている。これに対し、一般的にエフォート接合と呼ばれる 0-接合は、ボンドのエフォートが等しくかつ全ての流れの代数和がゼロであるといった特別な性質を持っている。エフォート及び流れの作用が逆になっているという意味で、0-接合は 1-接合の二元的な接合点と考えられる。変成器 TF の理想的な 2 ポート要素は、変圧器

のモジュールと呼ばれる比例無次元係数によって、エフォートすると共に流れるエフォート及び流れに関連している。ジャイレータ GY の理想的な 2 ポート要素は、1 つのポートでエフォートに関連しているけれども、エフォートの次元パラメータによる他の流れのエフォート動力は流れによって分割されている。全ての 0-接合、1-接合、変成器 TF 及びジャイレータ GY はパワーを保存する。また、活性部 Sf 及び Se はボンドグラフにパワーを供給する。

異なるシステムの一般化した要素とそれらを内蔵した相似によって、ボンドグラフモデル化工程は、次の表 2 に示すように整然とした手法で実行され、思考の効率化を招き、複雑なシステムのための組織化された動態分析モデルをエンジニアが迅速に確立する手助けとなる。即ち、機械システムでは 8 工程が実行され、電気システムでは 5 工程が実行され、流体システムでは 5 工程が実行される。

機械システム	<ol style="list-style-type: none"> 1. 物理システムを集中定数モデルに簡略化 2. 各速度に対して 1-接合を確立 3. I を 1-接合に接続し、0-接続を隣接した 1-接続の対の間に挿入 4. C 及び R を 0-接合に接続 5. 0-接合及び 1-接合を直接、或いは必要ならば TF 又は GF を用いて接続 6. 適宜動力及び速度源を挿入 7. 半矢印を付与し、ボンドにストロークを与える 8. グラフを簡略化
電気システム	<ol style="list-style-type: none"> 1. 回路構成を確立 2. 回路で特別な電圧を有する各ノードに対して 0-接合を確立 3. 1-ポートを 1-接合に添付することによって各 1-ポートを隣接対の 0-接合間に挿入し、1-接合を 2 つの隣接した 0-接合に結ぶ 4. 半矢印を付与し、ボンドにストロークを与える 5. 接地される特別なノードを選択し、グラフを簡略化
流体システム	<ol style="list-style-type: none"> 1. 流体線を集中定数システムに簡略化 2. 各圧の 0-接合を確立 3. C 要素を 0-接合に添付 4. I, R 又は TF を 1-接合に添付し、1-接合を 2 つの隣接した 0-接合の間に接続 5. グラフを簡略化

表 2

ボンドグラフのもう 1 つの注目すべき特徴は、標準的なシステム状態空

間方程式が、以降の数値解析のために与えられたボンドグラフ線図から自動的に規則的な方法で導き出せるということである。

(2) 機能モデル法

- 5 要素ユニットと演算で構成される機能モデルは、モデル化法を基礎とするもう 1 種類のパワーの流れであり、システムの物理的機能と表示手法でシステムに送信したパワーの流れを論証し、様々な専門技術者が容易にかつ互いに理解して協力することを可能にする。流れとポテンシャルの状態変数は第 4 図に示されるように主要なグラフィックフレームを構築し、流れとポテンシャルの積はボンドグラフの流れとエフォートのパワーになる。

- 第 1 図に示すような種々のシステムの可視化された要素ユニットは、流れ及びエフォートの間の基本的な構成法則を明確に説明している。なお、第 1 図における SMSM は本発明を示している。機能モデルの拡張と統一化は、小規模なサブシステムから大規模なサブシステムまでの階層的なモデルを組み立てることを容易にすると共に、部品から完成品までの機械を組み立てることを容易にし、更に機械を分解して部品を交換することも容易にする。機能モデルは、パラメータ及び非線形なモデル化の物理的性質を制御するために、機構的モデルと協力することができる。
- 20 更に、システムの状態空間方程式は機能モデルの線図から自動的に導き出すことができ、システム性能シミュレーションは数学方程式の数値計算によって導き出すことができる。

(3) ブロック線図法

- 25 商業的コード Matlab の Simulink のブロック線図モデルを検証する。Simulink ブロック線図は、既知の動的システムの数学的モデルを

表わす図示的モデルであり、それは、線で相互接続された有向直線とブロックとで成っている。それぞれの線は単一変数の流れを表わしており、ブロック出力とブロック入力との間を接続するようになっている。各ブロックの種類は、その入出力変数の特定な関係を表わしている。ブロック線図は、どんな種類のブロックも多くの例を含むことができる。ブロック線図を作成する簡単な手法は、システム数学方程式から始めることである。非線形のブロックライブラリは、非線形モデルを確立するのを助ける。ブロックをサブシステムに分類し、S-関数を用いて新しいブロックを作成する可能性は、複雑な線形パフォーマンス及び複雑な非線形パフォーマンスによって、複合システムのためのトップダウンアプローチとボトムアップアプローチの両方を用いて、階層モデルを組立てることを容認する。更に、ブロック線図上の次のシミュレーションは、ブロック線図で意味されるシステム方程式を記述することなく、Matlabの数値計算法を使用することで、Simulink 解法によって自動的に実行される。

(4) モデル化法の比較

ボンドグラフと機能モデルの統一モデル化のアプローチは、パワーの流れを基礎とする集中定数物理モデルのための視覚化された記述であり、それは、次のような類似した利点を有している。

- ・一般的なシンボルは、統一フォーマットで多岐にわたるモデルシステムに用いられ、異なったエネルギー種類を含んだグラフィックモデルに極めて相似している。
- ・システムの構成要素間の物理的な機能とパワーの交換は、絵画的な手法で図示される。
- ・状態空間方程式の標準形式は、グラフィックモデルから自動的に導

き出される。

これらの類似性に基づき、ボンドグラフ法は、以下の変換法則に従って、各ボンドグラフ要素を同等な機能モデル単位及び演算に置き換えることによって、同等な機能モデルに変換することができる。

1. ボンドグラフの各ボンドは、機能モデルの流れ及びエフォートの1対の指示された信号に対応する。

2. ボンドグラフにおける0-接合では流れが加算され、エフォートが分散される機能モデルの1対の演算を示している。そして、1-接合ではエフォートが加算され、流れが分散されるという類似の手法で扱われる。

3. ボンドグラフにおける1つのボンドの原因マークは、機能モデルにおける対応した流れとポテンシャルの方向を示している。

4. 変成器 TF は、それぞれ2対のエフォート及び流れを係数と比例させて関連付けることにより置き換えることができる。また、ジャイレータ GY は、それぞれ係数で1つのポートにおけるエフォートを他のポートの流れに関連付けることにより置き換えることができる。

5. ボンドグラフのエフォート源は機能モデルの入力ポテンシャル信号に対応しており、ボンドグラフのエフォート源は機能モデルの入力流れ信号に対応している。

たとえボンドグラフと機能モデルに類似性があり、互いに変わることができるとしても、それらにはそれら自身の特性がある。ボンドグラフは特殊記号による特別な学習を必要とし、どのグラフィックモデルを作成するかは技術者によって容易に受け付けられない。これに対し、機能

- モデルは普通の工学シンボルを使用しており、そのため容易に理解され、工学に容易に適用することができる。幾つかの非線形問題はボンドグラフによって記述されるために難しいが、それらは機械モデルを付加することによって、機能モデルで便宜的に考慮される。
- 5 要素ユニットで成り立つボンドグラフと機能モデルとを比較し、数学的なシンボルによって構成される Simulink のブロック線図モデルは、物理システムから直接モデル化を確立することが非常に困難である。そのため、明確な手法で数学的なモデルを記述しているブロック線図は、システムの物理的な機能とパワーの流れを論証することが困難である。
- 10 本発明は上述のような事情からなされたものであり、本発明の目的は、ボンドグラフ法、機能モデル法及びブロック線図法の各モデル化の利点を取り入れて融合し、複合システムの線形問題及び非線形問題に対しても、システムの物理的な機能とパワーの流れを容易に論証できるようにしたパワーの流れを基にした複合システムのモデル化法及びシミュレーション方法を提供することにある。
- 15

発明の開示

- 本発明はパワーの流れを基にした複合システムのモデル化法及びシミュレーション方法であり、複合システムに対して機能モデル法及びボンドグラフ法で標準化された要素ユニットを構成し、前記ボンドグラフ法及びブロック線図法で標準化された手順を構成し、Simulink 数値法で自動数値シミュレーションを構成している。
- 20

図面の簡単な説明

- 25 第 1 図は種々の動的システムの要素ユニットを示す図である。
第 2 図は種々のモデル化法とシミュレーション法の関係を示す図であ

る。

第 3 図は SDOF 機械システムの構造モデルの例を示す図である。

第 4 図は SDOF 機械システムの機能モデルの例を示す図である。

第 5 図は SDOF 機械システムの SMSM モデルの例を示す図である。

5 第 6 図は SDOF 機械システムのシミュレーション結果の一例であり、動力源及びユニット要素の値を示す特性図である。

第 7 図は SDOF 機械システムのシミュレーション結果の一例であり、速度源及びユニット要素の値を示す特性図である。

10 第 8 図は、動力源についての SMSM モデルのシミュレーション結果の一例を示す特性図である。

第 9 図は、速度源についての SMSM モデルのシミュレーション結果の一例を示す特性図である。

第 10 図は吊された物体の構造モデルの一例を示す図である。

第 11 図は吊された物体のボンドグラフモデルの一例を示す図である。

15 第 12 図は吊された物体の機能モデルの一例を示す図である。

第 13 図は吊された物体の SMSM モデルの一例を示す図である。

第 14 図は吊された物体に対する動力源の一例を示す波形図である。

第 15 図は SMSM モデルのシミュレーション結果（速度）の一例を示す波形図である。

20 第 16 図は SMSM モデルのシミュレーション結果（動力）の一例を示す波形図である。

第 17 図は、動力源及び機能モデルのシミュレーション結果の一例を示す波形図である。

第 18 図は非線形機構における構造モデルの一例を示す図である。

25 第 19 図は非線形機構における機能モデルの一例を示す図である。

第 20 図は非線形機構における包括的モデルの一例を示す図である。

第 21 図はサブシステム K の詳細を示すブロック図である。

第 22 図は動力源の一例を示す波形図である。

第 23 図は SMSM モデルのシミュレーション結果（速度）の一例を示す波形図である。

5 第 24 図は SMSM モデルのシミュレーション結果（動力）の一例を示す波形図である。

第 25 図は機能モデルのシミュレーション結果（速度及び動力）の一例を示す波形図である。

10 発明を実施するための最良の形態

本発明では、Metlab の商業コードの Simulink におけるボンドグラフ、機能モデル及びブロック線図の各利点に基づいて、パワーの流れに基づく実用的で信頼できる標準化されたモデル化法及びシミュレーション方法（SMSM）を提案し、標準化された素子ユニット、エフォートの流れを基にしたグラフィックフレーム、ルーチン化されたモデル化手順及び自動シミュレーションを、システムの数学方程式で書込むことなく融合している。典型的な線形動作及び非線型動作を持った機械システムの 3 つの体系を説明しているが、SMSM のモデル化手順及びグラフィックモデルの比較において、ボンドグラフ法及び機能モデル法はそれら方法の相違及び関係を開示している。数式及び機能モデルの数的結果に良く合致する SMSM のシミュレーション結果は、SMSM の実用性及び有効性を証明するものである。

本発明では、パワーの流れに基づく実用的で信頼できる標準化されたモデル及びシミュレーション方法（即ち、SMSM）を提案する。そして、SMSM は標準化されたモデルを確立し、複雑なシステムのための自動シミュレーションを実行するのに、Simulink におけるボンドグラフ、機能モデ

ル及びブロック線図モデルを利用している。このモデル化技術の応用として、幾つかの典型的な線形機構システム及び非線形機構システムは、数値的にシミュレーションされる。SMSM の有効性効率と同様に、分析結果が検証される。この方法は、電気、流体及び他の混合システムに適用することができ、また、有限要素法、CAE システム技術の能力を強化する実験的な統計方法などの他のモデル化法及び設計技術と融合することができる。

以下、図面に基づいて本発明の好適な実施例について詳細に説明する。

本発明に係る SMSM は第 2 図に示すように、ボンドグラフ法、機能モデル法及びブロック線図法を利用することによって開発されている。即ち、機能モデル法及びボンドグラフ法が標準化された SMSM の要素ユニットに組み込まれ、ボンドグラフ法及びブロック線図法が SMSM の標準化されたモデル化手順に組み込まれ、Simulink 数値法が SMSM の自動数値シミュレーションに組み込まれている。標準化された要素ユニットは第 1 図に示すように、Simulink ライブラリブロックによって作成されたサブシステムブロックであり、それは、簡易な手法でエフォート及び流れの状態変数間の種々のシステムにおける要素機能的な特性を表示するために、ボンドグラフ要素と機能モデル要素シンボルの概念を採用している。物理システムを直接モデル化する本発明に係る標準化モデル化手順は表 3 に示されており、それは、ボンドグラフを機能モデルに変換する変換法則を持つボンドグラフのモデル化手順に結合するようになっている。機械システムは 7 工程を有し、電気システムは 5 工程を有し、流体システムは 7 工程を有している。

機械システム	<ol style="list-style-type: none"> 1. 物理システムを集中定数モデルに簡略化 2. 動力の和の1対の演算及び各速度に対する速度分散を確立 3. 要素ユニットIを動力及び速度の対に接続 もしC及びRが存在すれば、動力の和及び速度分散の隣接した対の間の速度の和及び動力の分散の1対の演算を挿入 それからC及びRを演算特性の対に接続 4. 必要であれば、2対のエフォート及び速度に係数を乗算して接続 5. S-機能及びサブシステムツールを使用する非線形ブロックを確立 6. 適宜動力及び/又は速度源信号発生器を挿入 7. 幾つかのブロックをサブシステムにグループ化することによってグラフを簡略化
電気システム	<ol style="list-style-type: none"> 1. 回路構成を確立 2. 回路で特別な電圧を持った各ノードに対する電流和及び電圧分散の1対の演算を確立 3. 電流の和及び電圧の分散の隣接した対の間の電圧の和及び電流の分散の1対の演算を挿入 電流ユニットを演算対に接続 4. 適宜電圧及び/又は電流源信号発生器を挿入 5. 接地される特別な電圧ノードを選択することによってグラフを簡略化
流体システム	<ol style="list-style-type: none"> 1. 流体線を集中定数システムに簡略化 2. 各圧に対し、容積流速の和及び圧分散の1対の演算を確立 3. Cを容積流速の和及び圧分散の演算に添付 4. 容積流速の和及び圧分散の隣接した対の間の圧の和及び容積流速の分散の1対の演算を挿入 5. I及びRの要素ユニットを圧の和及び容積流速分散の1対の演算に添付 6. 必要であれば2対の隣接した容積流速及び圧に係数を乗算して接続 7. 適宜圧及び/又は容積流速源信号発生器を挿入

表 3

SMSM モデルの主要なグラフィックフレームは、機能モデルにおける流れ及びポテンシャルとして流れ及びエフォートによって構築され、サブシステムブロックを作成することにより階層的な手法で構築することができる。また、非線形パフォーマンスは、機能的な方法における機構モデルのように、非線形のサブシステムを構築することによって便宜的にモデル化することができる。従って、SMSM はモデル化アプローチを基礎とするパワーの流れであり、多分野システムのために便宜的に理解可能で規格化されたモデルを確立するのを助け、モデルがどのように組織化されているか、部品がどのように相互作用するかといった洞察を与える。自動数値シミュレーションはシステム方程式を記述する必要がなく、かつ方程式を計算するためのプログラムを作成する必要もなく、

Simulink 解法によって SMSM グラフィックモデルの上で実行される。従って、ユーザーは代数的な退屈でつらい作業と重荷を負わせられることなく、数値計算プログラムを作成するためにモデル化決定に集中することができる。

- 5 本発明の SMSM は、融通性が極めて高い。それは、物理的モデルから直接確立されることもできるし、或いは機能モデル及びボンドグラフモデルからも変換され得る。数学方程式又は電気回路のような物理的モデルから組み立てられたブロック線図は、SMSM モデルの一部として階層的なサブシステムに組み込むことができる。また、モデルチェンジは既存のグラフィックモデル上で便宜的に実行される。更に、SMSM シミュレーション工程は、Matlab ツールボックス、例えば実験解析法や最適化設計法を使用することによって、動的システムの他の解析及び設計法と関連される。

- 15 要するに、本発明に係る SMSM の利点は、複合システムの数値研究のための明瞭性、迅速な確立、明示的な機能及びパワーの流れの記述、広い応用性、自動シミュレーションである。

- 幾つかの典型的な機械システムが、SMSM モデル化とシミュレーション手順を論証するために研究されており、次に機能モデル、ボンドグラフモデル及び SMSM モデルの比較を行う。ここでの例は、線形問題及び
20 非線形問題を解決する場合に、本発明の能力を示すのに十分なものである。有効性と実用性はシミュレーション結果の比較で図示する。

(1) SDOF(Single Degree of Freedom: 自由度 1) 機械システム

- 構造モデルとして第 3 図に示すように、この SDOF 機械システムは質量 M 、スプリング K 及び 2 個のダッシュポット C_r , C_g で構成されている。第 4 図で示される機能モデルと、第 5 図で示される SMSM モデルと
- 25

は類似している。第4図の機能モデルがそうであるように、SMSMモデルも各要素ユニットの機能及びパワーの流れの方向を図示することができることは明白である。しかしながら、SMSMモデルの図形的な記述は、機能モデルのものより読み易くて簡単である。SMSMモデルは、上述した変換法則に従って機能モデルを変換することによって、或いは表3に示される標準的なモデル化手順に従ってシステム機構モデルから直接組み立てることによって確立される。

第6図及び第7図で示される動力源及び速度源の条件下で、第8図及び第9図で示されるシミュレーション結果が得られ、システム状態空間方程式の数値結果と合致している。即ち、第6図は、質量 M が10Kg、スプリング K が5.0N/m、ダッシュポット C_r が10Nsec/mでダッシュポット C_g が1.0Nsec/mの場合の動力源波形（インパルス）を示し、第7図は、質量 M が10Kg、スプリング K が5.0N/m、ダッシュポット C_r が10Nsec/mでダッシュポット C_g が1.0Nsec/mの場合の速度源波形（インパルス）を示している。そして、第8図は、第6図の動力源波形が入力された場合のSMSMモデルのシミュレーション結果であり、第9図は、第7図の速度源波形が入力された場合のSMSMモデルのシミュレーション結果を示している。SMSMモデルのシミュレーションは、機能モデル法が実行されるのと同様に数値コンピュータプログラムを作成するよりも、Simulink解法よりも便宜的に実行される。

(2) 吊された物体

第10図に示される典型的な振動問題は吊された物体であり、その物体は水平運動は無視されるが、平面における小さい角度の直線運動での振動であると思われる。種々のモデルが第11図、第12図及び第13図に示されている。第10図は構造モデル、第11図はボンドグラフモデ

ル、第 12 図は機能モデル、第 13 図は SMSM モデルの例である。第 13 図に示される SMSM モデルは、第 11 図のボンドグラフモデル及び第 12 図の機能モデルから変形され得る。また、SMSM モデルは、表 3 に示されるモデル化手順に従って、以下のステップのように第 10 図の構造モデルから直接確立され得る。

ステップ 1 : 4 対の速度－動力フレーム、即ち剛体に対する速度 v_g 及び各速度 ω 、並びにサスペンションに対する x_1 及び x_2 を確立する。

ステップ 2 : 要素ユニット（スプリング K、ダッシュポット C 及び質量 M）をそれらの対応する速度－動力フレームに添付する。

ステップ 3 : 4 つの速度－動力フレームを和及び分散演算並びにそれらの間の関係に従った変換係数ブロックによって接続する。第 13 図に示される L_1 及び L_2 の変換係数ブロックは第 11 図に示される変成器 TF のような手法でサブシステムを回転サブシステムに接続し、和の流れ v_1 、 v_2 及び第 13 図のエフォート分散 f_1 、 f_2 の演算は、それぞれ第 11 図のボンドグラフの 0－接合と等価である。

動力源 f_g の下での SMSM モデルのシミュレーション結果は第 14 図～第 16 図に論証されており、それは第 17 図に示される機能モデルのシミュレーション結果と、システム状態空間方程式の数値結果と一致している。第 14 図～第 16 図は質量 M が 1.0Kg、慣性 J が 15Kg/m²、スプリング K_1 及び K_2 がそれぞれ 5 Kg、ダッシュポット C_1 及び C_2 がそれぞれ 1.0N・s/m、D1 が 5.0m、D2 が 2.0m の条件であり、第 14 図は動力源の入力波形（ステップ）を示しており、その時の SMSM モデルの

シミュレーション結果が第 15 図及び第 16 図である。

(3) 非線形機械システム

次に、典型的な素材と摩擦非線形性を持った第 18 図に示すような非
5 線形機械システムを検証する。この例は、質量 M をばね・ダンパーと梔
子で結んだ構造を持っており、質量 M と摺動面の間に生じる摩擦力 F_f
を考慮している。また、支点 c で支えられた梔子は、アーム比 $R = r_2/r_1$
が一定となるように、質量 M とばね・ダンパーのそれぞれと繋がる a 点
及び b 点で摺動可能となっている。

10 第 20 図に示される SMSM モデルにおいて、2 ステージのスプリング
の剛性は、第 21 図に示すようなサブシステム K によってモデル化され
ており、Varstiff-1 の S-機能は第 19 図の機構モデルで示された剛性
性質を制御するようにプログラムされている。質量 M と地面の間の摩
15 擦は 2 つのステージに分けられ、1 つは質量 M が動き始めない時の静
摩擦であり、もう 1 つは質量 M が地面を滑る時のスライド表面の圧力
に比例しているクーロン動摩擦である。非線形摩擦は、第 20 図に示さ
れる摩擦制御のもう 1 つのサブシステムによってモデル化される。レバ
ーを介してのパワーの流れ変換は、係数 R をそれぞれ速度及び動力に乘
算された 2 つの変換係数ブロックとして記述されている。

20 動力源 F_i の下でのシミュレーション結果は第 22 図～第 24 図に示さ
れており、第 25 図に示される機能モデルのシミュレーション結果及び
システム状態空間方程式の数値結果と一致している。第 22 図～第 24
図では、質量 M が 3 Kg、アーム比 r_2/r_1 が 2.0、スプリング $K1$ ($F_k \leq 5N$)
が 400N/m、スプリング $K2$ ($F_k > 5N$) が 800N/m、ダンパー D が 20N・
25 s/m、速度 V_0 が 0 m/s、摩擦係数 μ が 0.1 の条件であり、この場合の
動力源が第 22 図の波形であり、この時の SMSM モデルの速度シミュレ

ーション結果が第 23 図であり、動力シミュレーション結果が第 24 図である。この結果からも、本発明のように非線形モデルを作成し、Simulink のツールを使用して数値シミュレーションを実行することが非常に便利である。

- 5 規格化されたモデル化アプローチは、パフォーマンスシミュレーションにとって重要である。本発明では、パワーの流れに基づいた SMSM の包括的なモデル化及びシミュレーション方法を提案する。本発明方法は標準化された要素ユニット、グラフィックフレームをベースとするエフォートの流れ、ルーチン化されたモデル化手順及び自動シミュレーション
- 10 ン工程の利点に基づき、複雑なシステムをモデル化するのに時間を節約できて便利である。典型的な線形特性及び非線形特性を備えた幾つかの機械システムのシミュレーション結果から、本発明方法の有効性及び実用性が検証された。このアプローチの成功は、モデル化手順及び自動計算処理を融合することによって、Simulink のボンドグラフ、機能モデル
- 15 ル及びブロック線図の利点を得ているということである。本発明のモデル化技術とシミュレーション解析法は、複雑な方法で相互作用する機械システム、電気システム及び流体システムで成る多分野エンジニアリングシステムのための規則的な方法で統一された階層的なモデルを作成することを容認し、コンピュータで自動シミュレーション解析を有効に実
- 20 行する。本発明方法は、他のタイプの有限要素解析法や製品設計方法などの解析法と組み合わせることを容易にし、複雑なエンジニアリング問題のために CAE システム技術の能力を高めることができる。

産業上の利用可能性

- 25 本発明は、便宜的に多数訓練システムのための高速読取可能で、単一化されかつ階層的なモデルを作成し、自動シミュレーションを効果的に

- 実行する SMSM は、大規模生産設計及び開発のための効果的なモデリング及び動作予測技術を提供する。本発明は、機械系、電気系、化学系、制御系などの多領域問題へ適用でき、全体の方程式が不要という意味でモデルの作成が容易であり、またツールボックスを利用できる点で制御、
- 5 最適化共に効率の良い連携が可能となる。従って、パワーの流れに基づくモデル化法の有効性が高く、工学上及び工業上貢献する点が極めて大きいものである。

請 求 の 範 囲

1. 複合システムに対して機能モデル法及びボンドグラフ法で標準化された要素ユニットを構成し、前記ボンドグラフ法及びブロック線図法で標準化された手順を構成し、Simulink 数値法でも自動数値シミュレーションを構成したことを特徴とするパワーの流れを基にした複合システムのモデル化法及びシミュレーション方法。
2. 前記複合システムが機械システムである場合、物理システムを集中定数モデルに簡略化し、動力の和の 1 対の演算及び各速度に対する速度分散を確立して要素ユニット I を動力及び速度の対に接続し、もし C 及び R が存在すれば、動力の和及び速度分散の隣接した対の間の速度の和及び動力の分散の 1 対の演算を挿入し、その後に C 及び R を演算特性の対に接続し、必要であれば 2 対のエフォート及び速度に係数を乗算して接続し、S - 機能及びサブシステムツールを使用する非線形ブロックを確立し、適宜動力及び／又は速度源信号発生器を挿入し、幾つかのブロックをサブシステムにグループ化することによってグラフを簡略化している請求の範囲第 1 項に記載のパワーの流れを基にした複合システムのモデル化法及びシミュレーション方法。
3. 前記複合システムが電気システムの場合、回路構成を確立し、回路で特別な電圧を持った各ノードに対する電流和及び電圧分散の 1 対の演算を確立し、電流の和及び電圧の分散の隣接した対の間の電圧の和及び電流の分散の 1 対の演算を挿入し、電流ユニットを演算対に接続し、適宜電圧及び／又は電流源信号発生器を挿入し、接地される特別な電圧ノードを選択することによってグラフを簡略化している請求

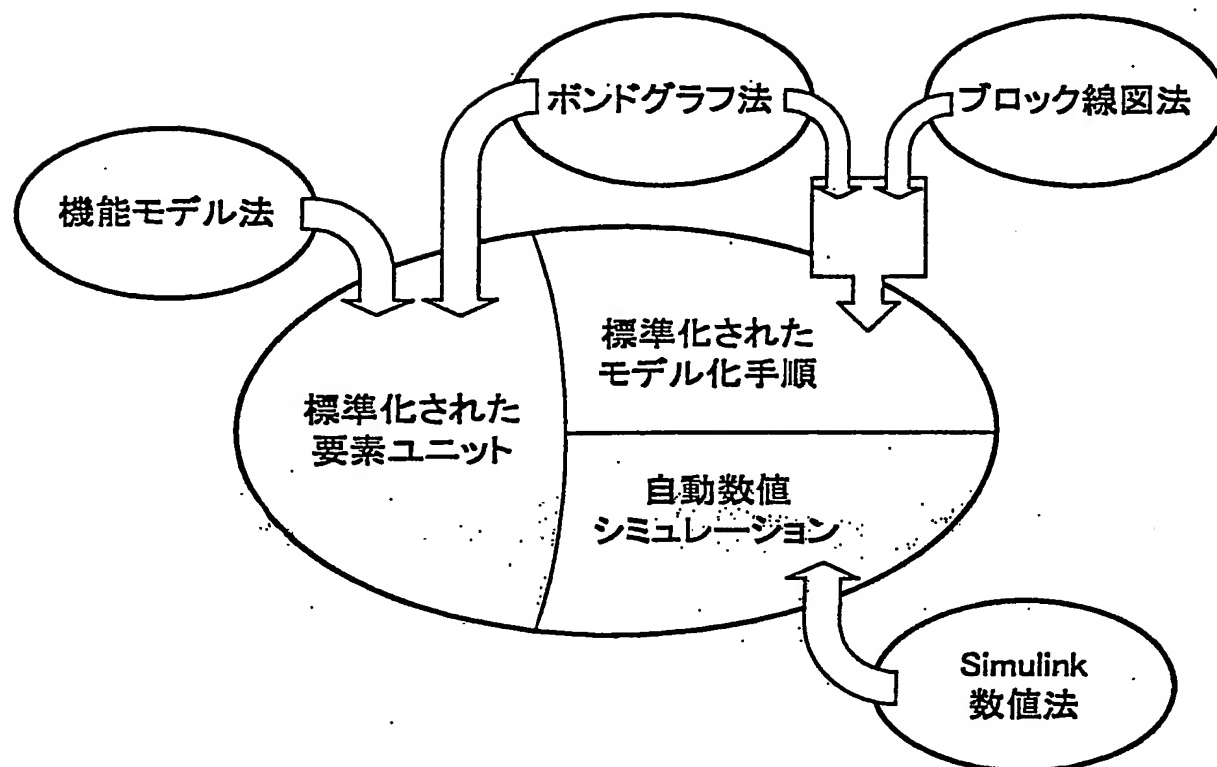
の範囲第 1 項に記載のパワーの流れを基にした複合システムのモデル化法及びシミュレーション方法。

4. 前記複合システムが流体システムである場合、流体線を集中定数モデルに簡略化し、各圧力に対し、容積流速の和及び圧力分散の 1 対の演算を確立し、C を容積流速の和及び圧力分散の演算に添付し、容積流速の和及び圧力分散の隣接した対の間の圧力の和及び容積流速の分散の 1 対の演算を挿入し、I 及び R の要素ユニットを圧力の和及び容積流速分散の 1 対の演算に添付し、必要であれば 2 対の隣接した容積流速及び圧力に係数を乗算して接続し、適宜圧力及び／又は容積流速源信号発生器を挿入するようになっている請求の範囲第 1 項に記載のパワーの流れを基にした複合システムのモデル化法及びシミュレーション方法。

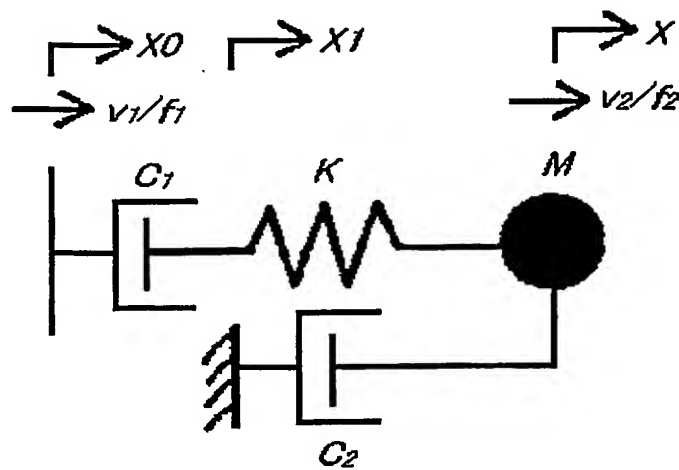
第1図

		直動システム	回転システム	電気システム
機能 モデル	慣性 ユニット	質量ユニット: (動力) $\rightarrow \frac{1}{M} \rightarrow$ (速度)		インダクタンスユニット: (電圧) $\rightarrow \frac{1}{L} \rightarrow$ (電流)
	キャパシタ ユニット	剛性: (速度) $\rightarrow K \rightarrow$ (動力)		キャパシタンスユニット: (電流) $\rightarrow \frac{1}{C} \rightarrow$ (電圧)
	抵抗 ユニット	ダンピングユニット: (速度) $\rightarrow G_m \rightarrow$ (動力)		抵抗ユニット: (電圧) $\rightarrow \frac{1}{R} \rightarrow$ (電流)
SMSM	慣性 ユニット	質量ユニット: M その詳細サブシステム (動力) $\rightarrow \frac{1}{\text{Mass}} \rightarrow$ (速度) In 1 \rightarrow Out 1	慣性ユニット: J その詳細サブシステム (トルク) $\rightarrow \frac{1}{J} \rightarrow$ (角速度) In 1 \rightarrow Out 1	インダクタンスユニット: L その詳細サブシステム (電圧) $\rightarrow \frac{1}{L} \rightarrow$ (電流) In 1 \rightarrow Out 1
	キャパシタ ユニット	剛性ユニット: K その詳細サブシステム (速度) $\rightarrow K \rightarrow$ (動力) In 1 \rightarrow Out 1	剛性ユニット: K_r その詳細サブシステム (角速度) $\rightarrow K_r \rightarrow$ (トルク) In 1 \rightarrow Out 1	キャパシタンスユニット: C その詳細サブシステム (電流) $\rightarrow \frac{1}{C} \rightarrow$ (電圧) In 1 \rightarrow Out 1
	抵抗 ユニット	ダンピングユニット: G その詳細サブシステム (速度) $\rightarrow G \rightarrow$ (動力) In 1 \rightarrow Out 1	ダンピングユニット: G_r その詳細サブシステム (トルク) $\rightarrow G_r \rightarrow$ (角速度) In 1 \rightarrow Out 1	抵抗ユニット: $\frac{1}{R}$ その詳細サブシステム (電圧) $\rightarrow \frac{1}{R} \rightarrow$ (電流) In 1 \rightarrow Out 1

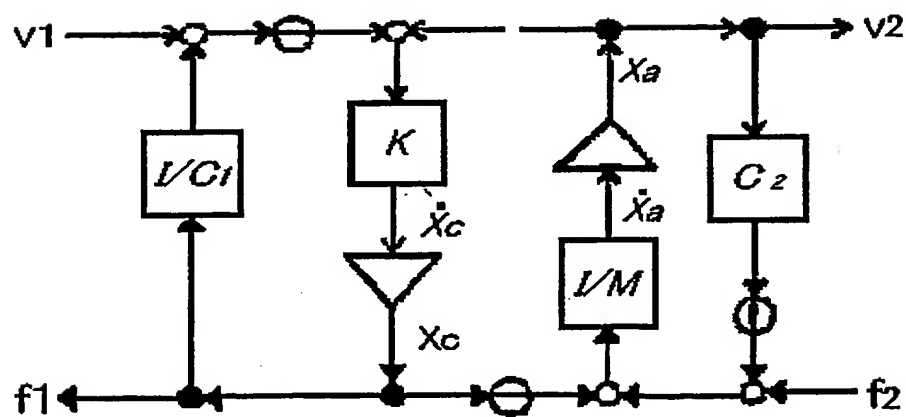
第2図



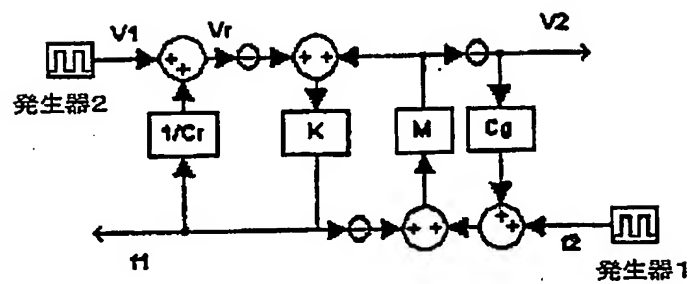
第3図



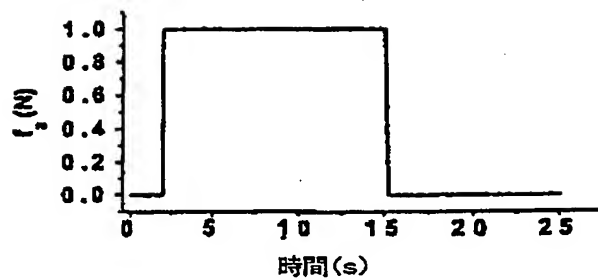
第4図



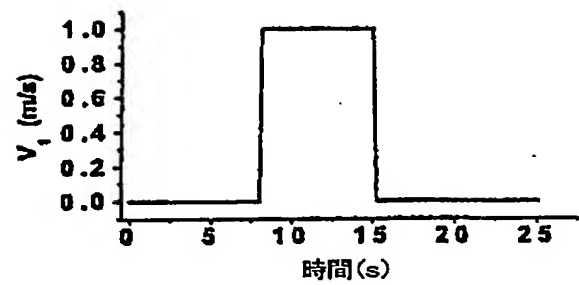
第5図



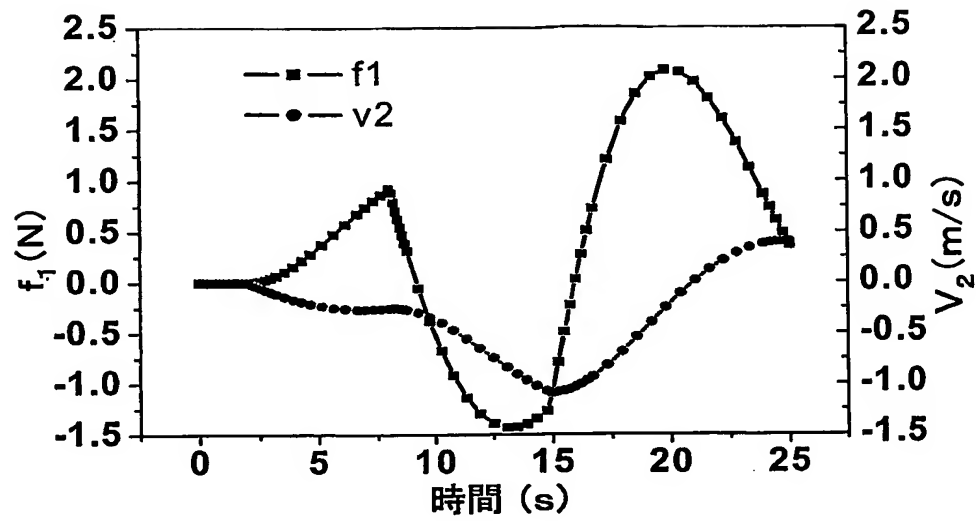
第6図



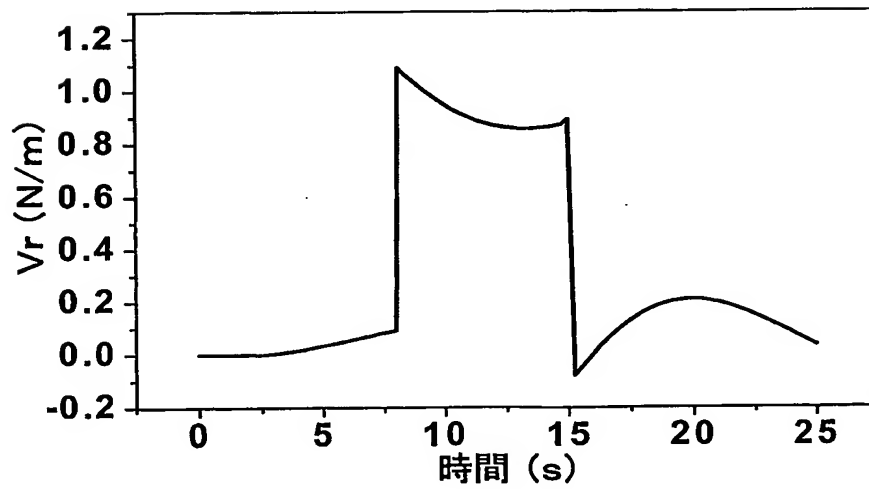
第7図



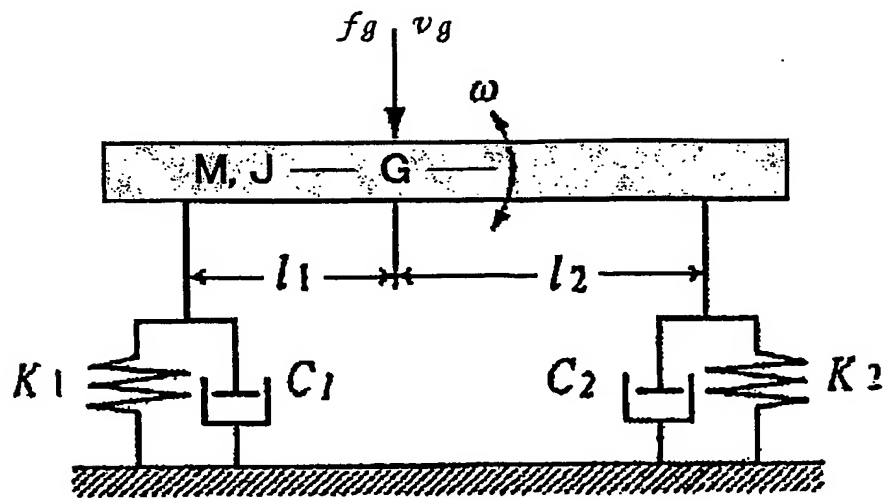
第8図



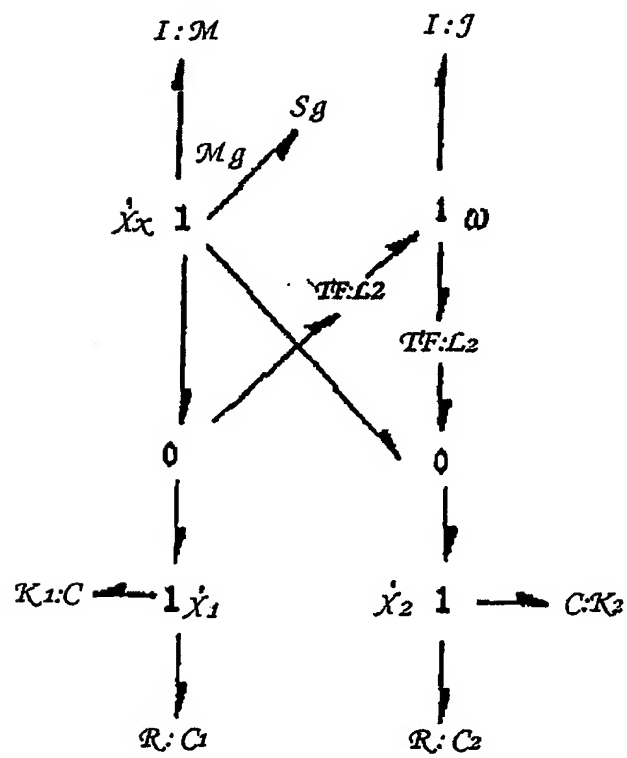
第9図



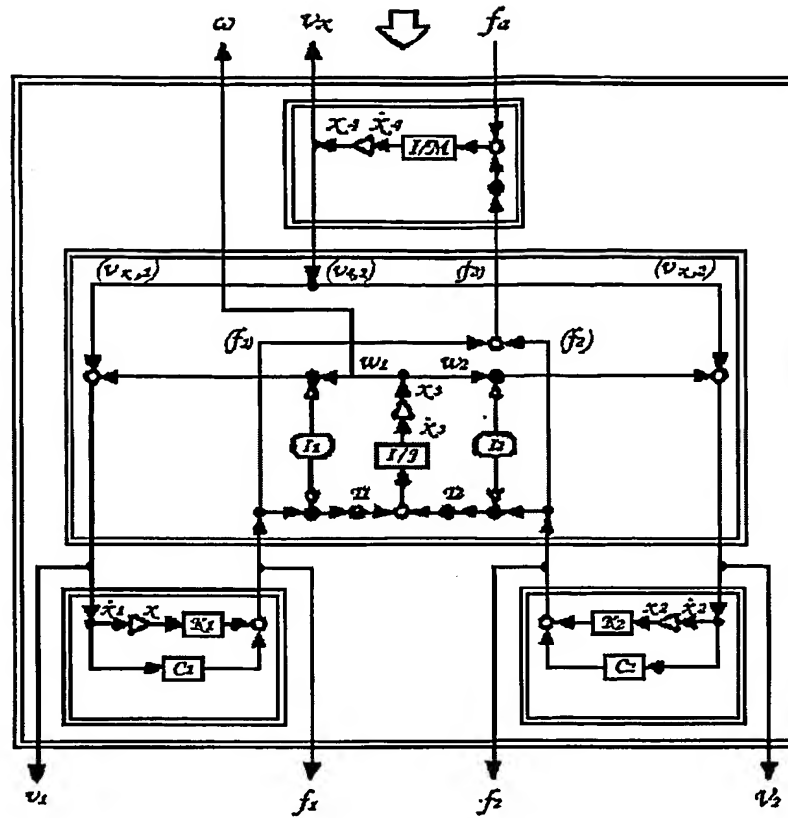
第10図



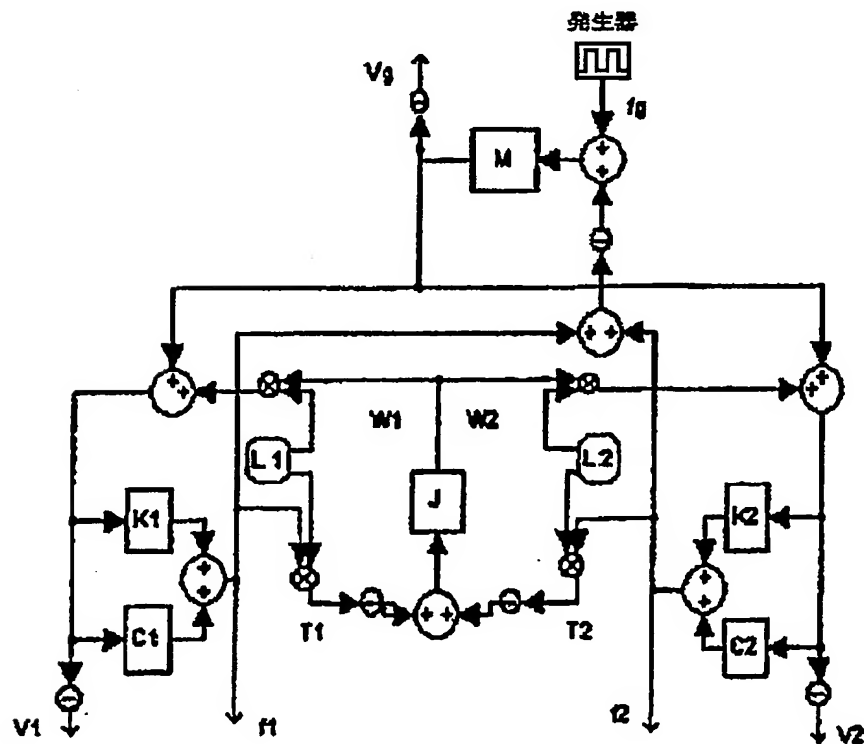
第11図



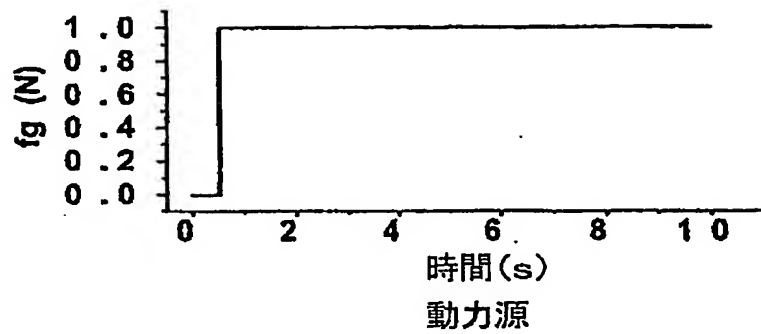
第12図



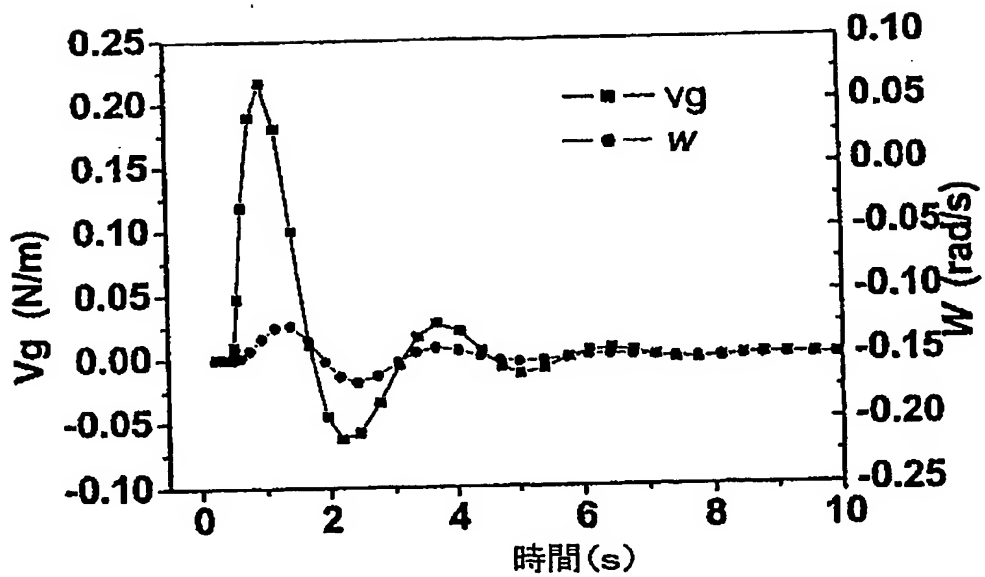
第13図



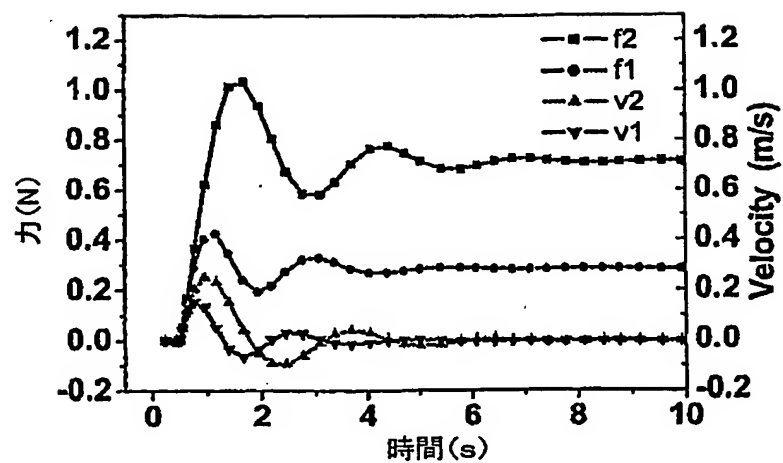
第14図



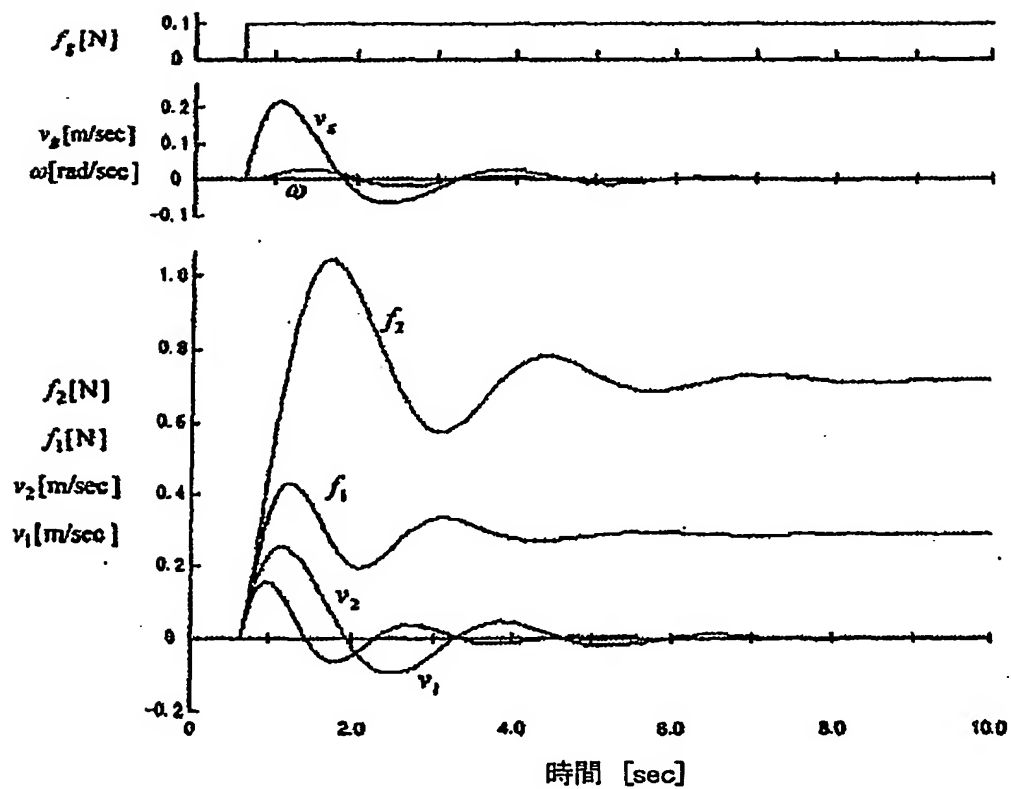
第15図



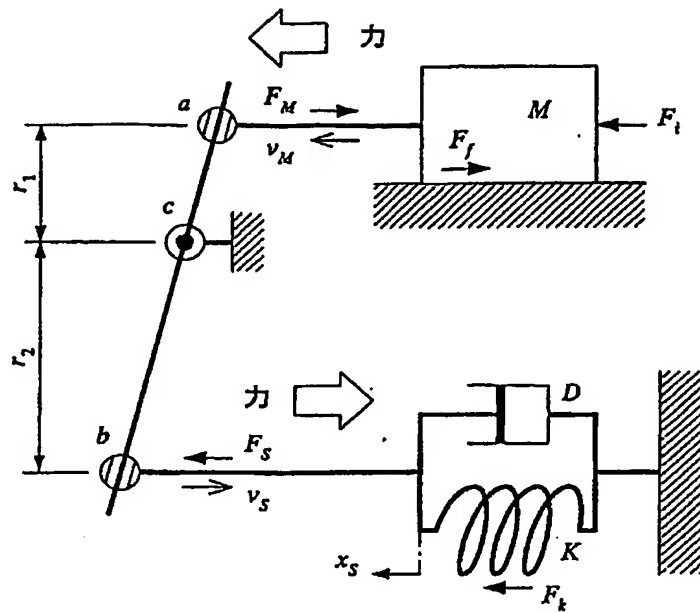
第16図



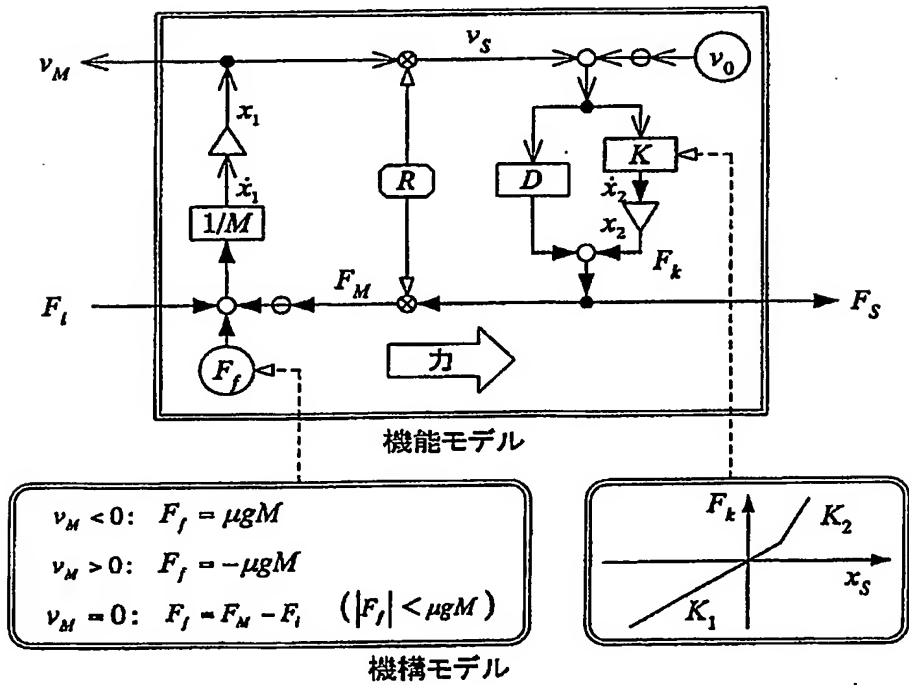
第17図



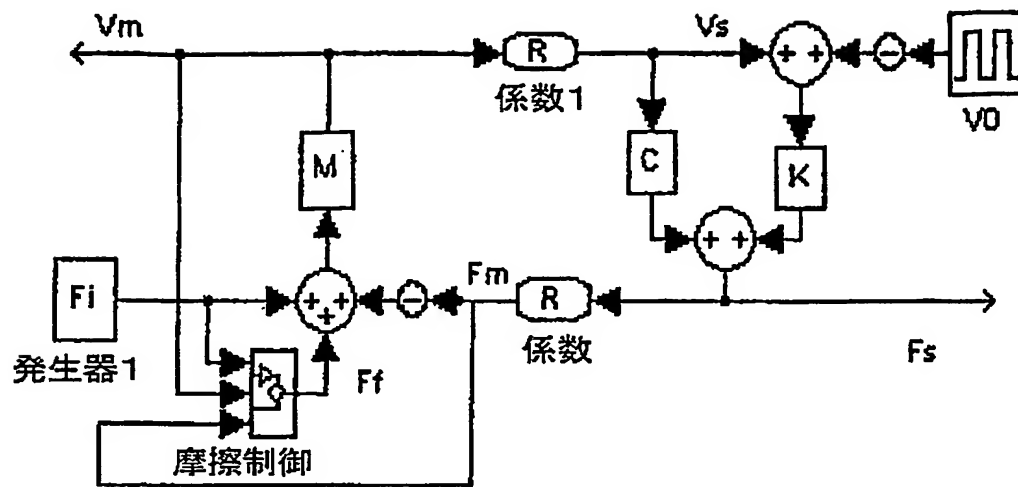
第18図



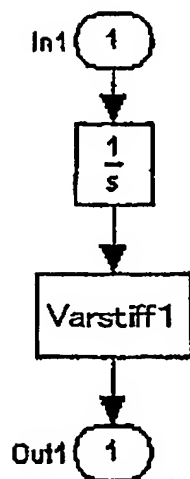
第19図



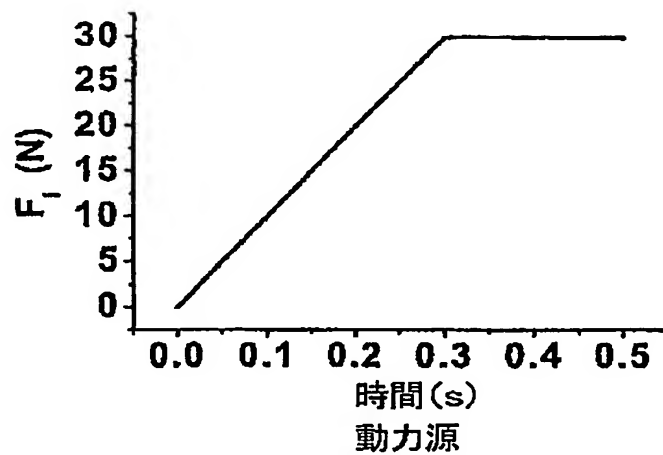
第20図



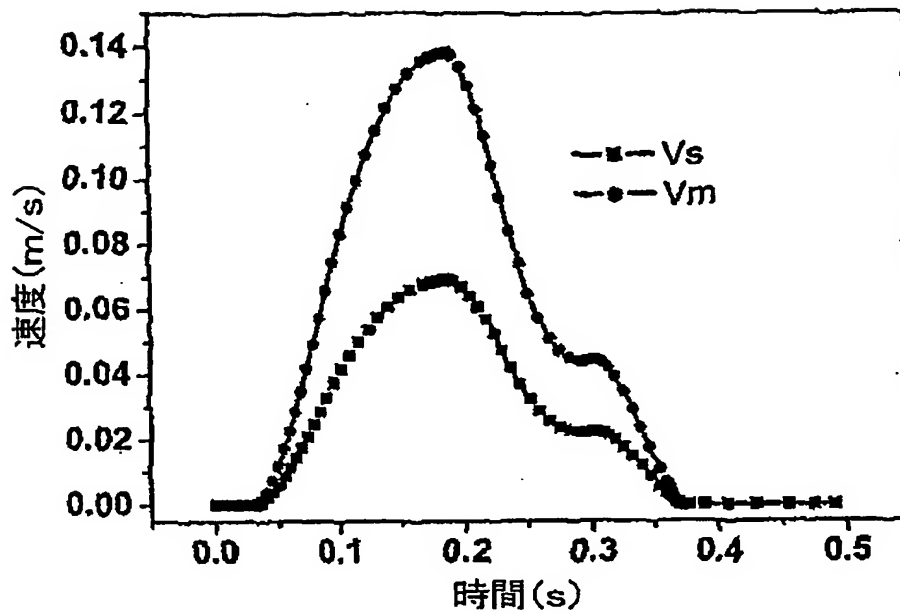
第21図



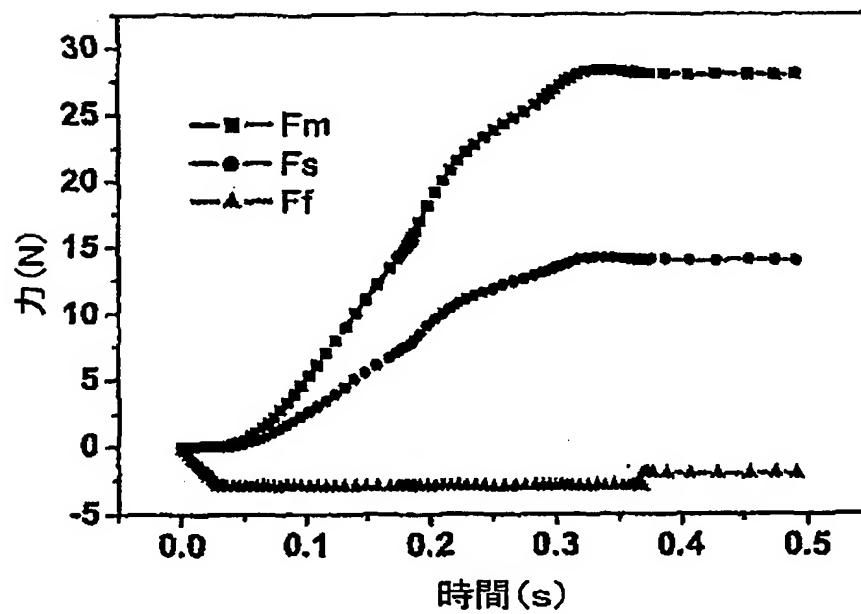
第22図



第23図



第24図



第25図

